

# 拡大する応用分野に対応して改善を続けるIGBT

Evolution of IGBTs Suitable for Expanded Range of Applications

二宮 英彰

梅川 真一

脇山 成一郎

西谷 和展

■ NINOMIYA Hideaki

■ UMEKAWA Shinichi

■ WAKIYAMA Seichiro

■ NISHITANI Kazunobu

パワーデバイスの一つであるIGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）は、家電製品から産業機器まで様々な用途に使用されている。家庭用調理器の電化や環境分野の太陽光・風力発電の電力制御などにその用途が拡大しており、高耐圧、低損失、高速動作、及び高破壊耐量などについて更なる性能の向上が求められている。

これらの要求に応えるために東芝は、高破壊耐量のためのノンラッチアップ構造（1984年）や、低損失を実現するIE（電子注入促進）効果（1993年）を用いたIGBTを世界で初めて開発してIEGT（Injection Enhanced Gate Transistor）として製品化してきた。また、IGBTの構造を改善し、薄型化を実現して低損失化を進めている。これらの技術を適用することで、民生用から産業用まで多岐にわたる用途に対応して最適に設計した製品を開発している。

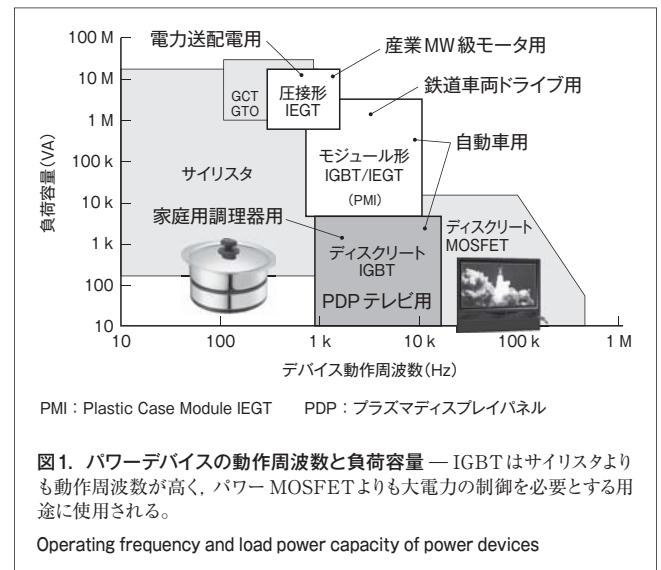
Insulated gate bipolar transistors (IGBTs) have been used for many applications, from home appliances to industrial products. The range of applications is now expanding to induction heating (IH) cooking equipment, the environmental field such as photovoltaic and wind-power generation, and so on. Furthermore, higher breakdown voltage, lower switching loss, higher switching speed, and higher robustness are required for IGBTs.

To meet these requirements, Toshiba has developed a non-latch-up IGBT for higher robustness and an injection enhanced gate transistor (IEGT) utilizing the injection enhancement (IE) effect for lower power loss. We are now promoting the development of suitable power devices for each application.

## 1 まえがき

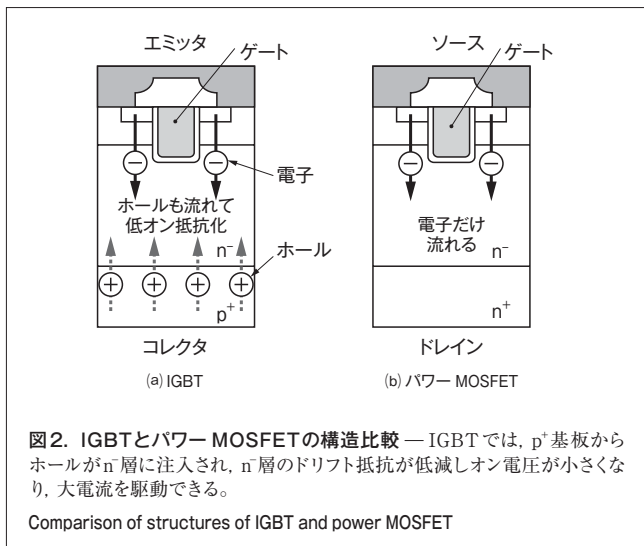
東芝は、パワーデバイスの一種であるIGBTについて、高破壊耐量を達成するノンラッチアップ構造を1984年に論文発表し<sup>(1)</sup>、1985年に、定格1,000 V - 25 Aのものを製品化した。その後、大電流化と高耐圧化を進めている。パワーデバイスの動作領域は、図1に示すように、デバイス動作周波数と負荷容量によって分かれている。IGBTの動作領域は、サイリスタとパワーMOSFET（金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ）の中間にあり、サイリスタより動作周波数が高く、パワーMOSFETより大きい電力を制御できる。近年、家庭用調理器や環境分野の電力制御機器など、IGBTの応用分野が拡大しており、高耐圧、低損失、高速動作、及び高破壊耐量など更なる性能の向上が求められている。

当社は、低損失化を図るためにIE効果を用いてIGBTの特性を改良し、定格数kV - 数kAのパワーデバイスIEGTを開発した<sup>(2), (3)</sup>。この主な用途は産業分野のMW級のモータ制御で、従来GTO（Gate Turn-off Thyristor）やGCT（Gate Commutated Turn-off Thyristor）といわれるサイリスタが使用されている。IEGTの搭載によって、電力変換効率の向上、装置の省スペース及び省エネが実現した。一方、家庭用調理器やテレビなどの民生機器分野では、各々の用途に応じて最適に設計したIGBTを開発している。ここでは、主に民生機器用IGBTの概要とその応用について述べる。



## 2 パワーデバイスの種類とIGBTの基本構造

IGBTは、MOSゲートによる電圧駆動性とバイポーラ動作による低オン電圧の両立を実現したデバイスである。IGBTの基本構造は、図2に示すようにパワー MOSFETに似ているが、パワー MOSFETがn<sup>+</sup>基板を用いるのに対して、IGBTではp<sup>+</sup>基板を用いる。パワー MOSFETを高耐圧化する場合、n<sup>-</sup>層のドリフト抵抗がオン抵抗の多くを占めているため、低オ

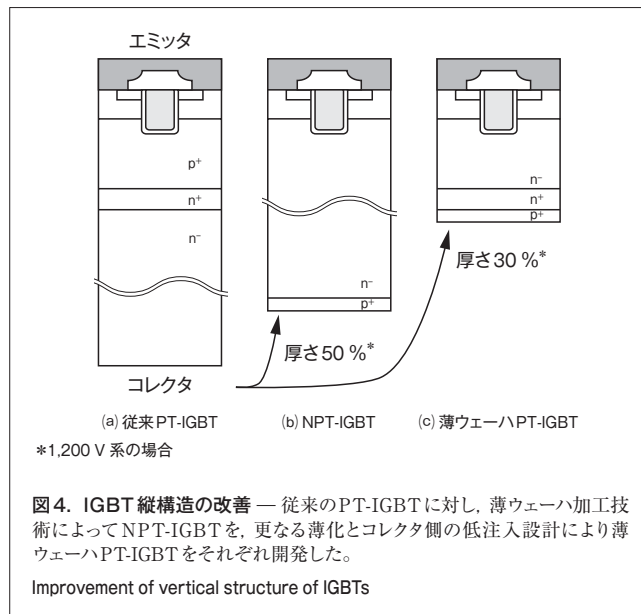
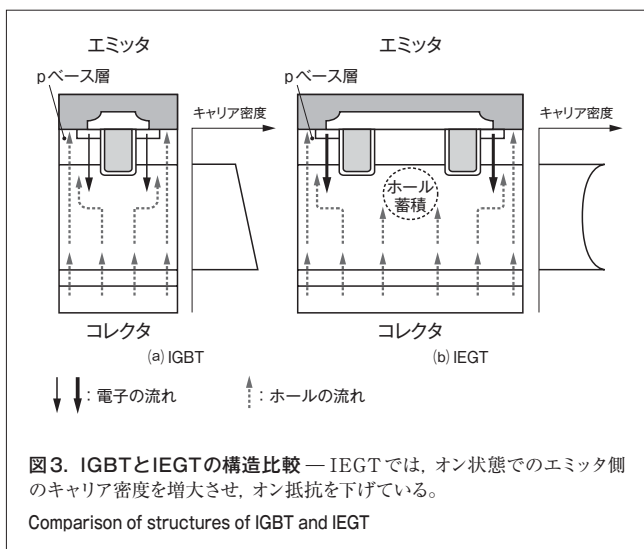


ン電圧化が困難である。しかし、IGBTでは、MOSゲート部から電子が注入された後、 $p^+$ 基板からホールが少数キャリアとして $n$ 層に注入されることで、伝導度変調により $n$ 層のドリフト抵抗が低減し、オン電圧を小さくできる。

耐圧が数kV以上のIGBTの性能を改善するためにIE効果のコンセプトを導入した、IEGTが製品化されている。IEGTは、当初数kV以上の高耐圧デバイスとして製品化されたが、現在、その適用範囲は600~1,200V級にまで拡大されている。

IGBTとIEGTの基本構造の比較を図3に示す。従来のIGBTに対してIEGTでは、オン状態でエミッタ側のキャリア密度が増大している。これは、トレンチ構造とエミッタコンタクトの間引き構造によりホールに対する障壁が形成されることで、 $p$ ベース層へ流れ込むホールが減少し、相対的に電子の注入量が増加するためである。

また、IGBTは縦方向に電流を流すデバイスのため、チップを薄くするとオン抵抗とスイッチング損失を改善できる。縦構



造の改善によるIGBTの特性改善も進められている(図4)。従来のPT (Punch Through)-IGBTに対して、薄ウェーハ加工技術の進化でNPT (Non Punch Through)-IGBTを製品化し、更に、コレクタ側を低注入設計にすることで薄ウェーハPT又はFS (Field Stop)-IGBTを開発した。

### 3 IGBTの応用例

#### 3.1 種類と用途

当社製IGBTとIEGTのコレクタ電流( $I_c$ )-コレクタ・エミッタ間電圧( $V_{ces}$ ) 定格別のラインアップと主な用途を図5に示す。定格 $V_{ces}$ が1,500V、 $I_c$ が100A程度以下のIGBTは、主にTO-3P系などのパッケージを用いたモールド形デバイスで、ディスクリートIGBTと呼ばれている。パッケージの形状は、汎用のトランジスタと同じ3本足のTO-3P系やTO-220系と、面実装に適したSOP-8系やSIS系に大別される。主な用途はIH (Induction Heating) 調理器や電子レンジといった家庭用調理器、プラズマディスプレイパネル (PDP) テレビ、カメラのストロボフラッシュ用電源などである。

定格 $I_c$ が400A、 $V_{ces}$ が1,700V以上のデバイスは、複数チップを並列に組み立てた大容量パッケージで、主な用途は電力送配電や鉄道車両などである。使用される装置や機器の機能によって選択できるように、片面放熱で内部絶縁されて使い勝手の良いモジュール形IEGTデバイスPMI (Plastic Case Module IEGT) と、両面放熱によってパワー密度向上と高電圧・大電流下での高信頼性を実現した当社独自のマルチチップ圧接形IEGTデバイスPPI (Press Pack IEGT) の2種類が製品化されている。

これらIGBTの用途をIGBTチップの電流密度( $J_c$ )と $V_{ces}$

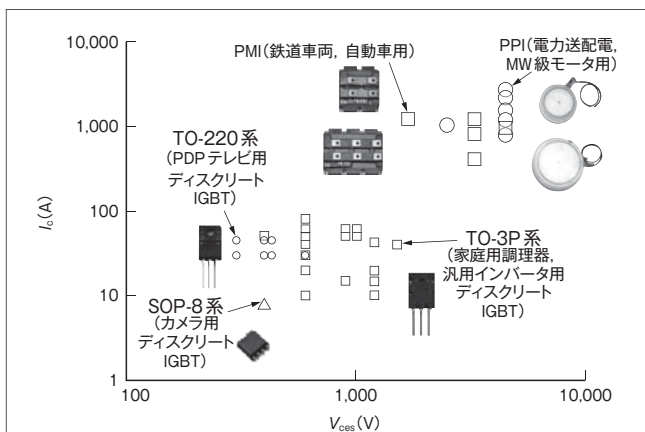


図5. 東芝IGBT及びIEGTの定格 — 定格  $V_{CES}$  が1,500 V、 $I_c$  が100 A程度以下のディスクリートIGBTは、IH調理器、PDPテレビ、カメラのストロボフラッシュなどの用途に、定格  $V_{CES}$  が1,700 V、 $I_c$  が400 A以上のPMIやPPIは、電力送配電や鉄道車両などの用途向けに製品化されている。  
Ratings of Toshiba IGBTs and IEGTs

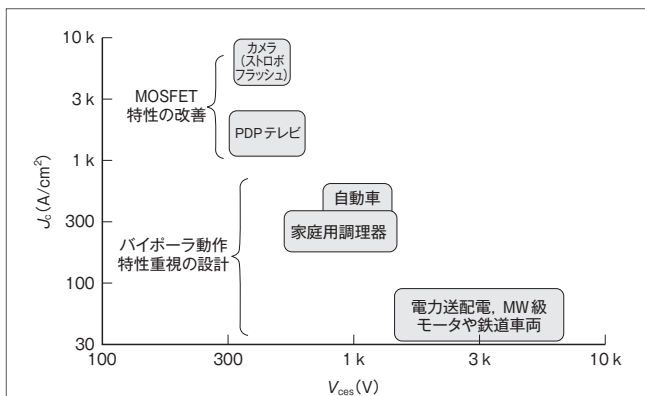


図6. 東芝IGBT及びIEGTの用途とチップ電流密度 — 用途によって電流密度や耐圧系、損失特性、破壊耐量の仕様が異なるため、それぞれの用途に対応した製品を開発している。  
Chip current density and applications of Toshiba power devices

で示す(図6)。電力送配電、MW級モータや鉄道車両などに使用されるIEGTでは、 $J_c$ が数十A/cm<sup>2</sup>であるが、家電製品やテレビなどで使用されるIGBTでは、 $J_c$ が数百～数千A/cm<sup>2</sup>である。カメラのストロボフラッシュ用IGBTでは、数千A/cm<sup>2</sup>という大きな $J_c$ が必要になるため、チャンネル抵抗の低減を重視して開発した。また、IH調理器や電子レンジなどの家庭用IGBTでは、40～50 kHzのスイッチング損失と大電流時の低オン抵抗性を両立させるため、バイポーラ動作特性をより重視した設計を適用している。

### 3.2 IH調理器への応用

IH調理器は、火を使わないで直接鍋を加熱するため、安全性と快適性の両面から需要が高まっている。特に、台所に固定設置されるビルトインタイプのIH調理器は、1口当たりの電力が1～3 kWと大出力であり、高周波駆動インバータには電

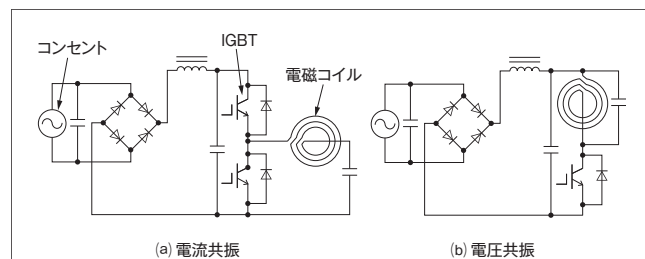


図7. IH調理器の高周波駆動回路 — IH調理器の出力は1～3 kWと大きく、高周波駆動インバータ回路に電流共振や電圧共振というソフトスイッチング回路を用いてIGBTのスイッチング損失を抑制している。  
High-frequency drive circuits of IH cooker

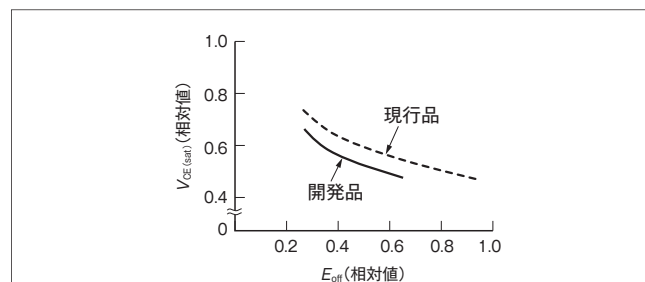


図8. IH調理器用IGBTの特性改善 —  $E_{off}$  と  $V_{CE(sat)}$  のトレードオフ関係を、薄ウェーハ化や表面構造の最適化で改善した。左下に行くほど理想的な特性に近づく。  
Improvement of characteristics of IGBTs for IH cooker

流共振や電圧共振といったソフトスイッチング回路を用いて、IGBTのスイッチング損失を抑制している(図7)。

近年、鉄やステンレスといった磁性体だけではなく、アルミニウムや銅のような非磁性体の鍋にも対応する“オールメタル対応”のIH調理器が普及している。この場合、インバータ回路の周波数を更に上げる必要があり、スイッチング損失の低減が要求される。最新の開発品は、薄ウェーハ化とコレクタ側の低注入設計により、ターンオフ損失( $E_{off}$ )とオン電圧( $V_{CE(sat)}$ )のトレードオフ関係を改善している(図8)。

IH調理器にIGBTを搭載したときの損失をシミュレーションした結果、開発品は現行品に比べて、オン抵抗による定常損失とスイッチング損失がともに低減している(図9)。

### 3.3 PDPテレビへの応用

PDPを用いた薄型テレビは、コントラストが高い自己発光型のため視野角が広い、また動画解像度が高いなどの特長があり、需要が高まっている。パネルの各セルは容量特性を持っており、各セルを発光させるために、数百Aの高周波パルス大電流を流す必要がある。この大電流供給回路はサステイン回路(図10)と呼ばれ、従来、高速応答性に優れるパワーMOSFETが搭載されていた。パワーMOSFETに代えて大電流で低オン抵抗の高速IGBTを用い、パネルの安定放電に重要な、電圧降下と損失の低減を実現し、大幅に部品点数を

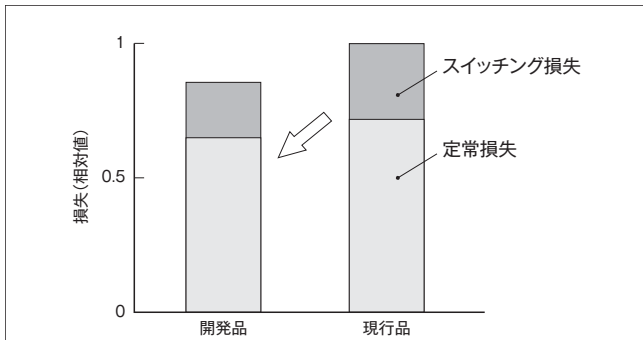


図9. IH調理器用IGBTの損失シミュレーション— IGBTの特性改善で定常損失とスイッチング損失がともに低減し、開発品の総合損失は現行品に比べて15%低減した。

Los simulation of IGBTs for IH cooker

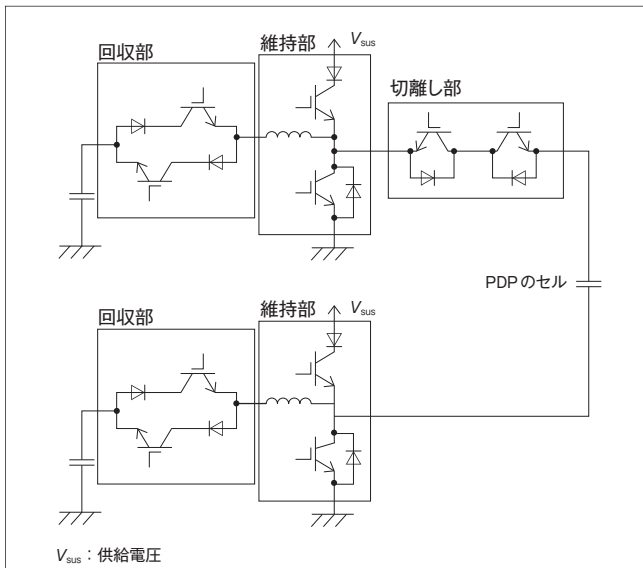


図10. PDPテレビ駆動用のサステイン回路— 大電流供給回路の維持部、回収部、切離し部において、パワーMOSFETの代わりにIGBTを用い、PDPの安定放電に重要な電圧ドロップや損失を低減した。

Sustain circuit for plasma display panel (PDP) TV

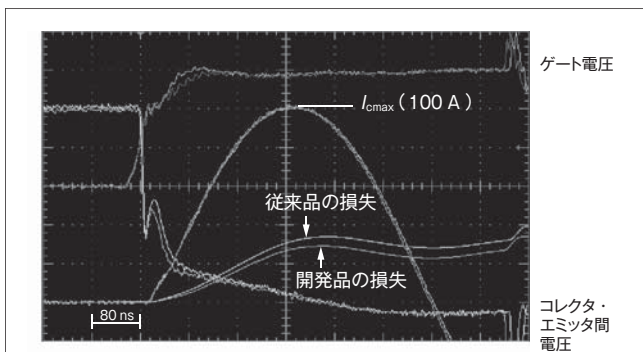


図11. PDPテレビ用IGBTのターンオン波形— 微細化とチップ縦方向の最適な設計で、ターンオン時の損失を低減した。

Turn-on waveforms of IGBTs in PDP TV

削減できた。最近の薄型テレビは、フルHD (1,920×1,080画素) 映像対応の高精細化や省エネ志向に合わせた低消費電力化が進んでいる。高精細化することにより、セル数が大幅に増加するため、サステイン回路の電流は増加する。そのうえで低消費電力を実現するためには、パネルの放電効率を上げるとともにIGBTの低損失化が鍵となる。最新の開発品では、微細化及びチップ縦方向設計の最適化によってターンオン時の損失を低減している (図11)。

## 4 あとがき

当社は、民生用から産業用機器までのそれぞれ異なる要求性能に対応して、各々の用途に適したIGBTやIEGTを開発してきた。IGBTの性能は、1980年代に実用化されて以降飛躍的に進歩している。最近ではIGBTチップにダイオード機能を設けた逆導通などの複合化も検討されている。更に、パワーMOSFETがSJ (Super Junction) 構造を取り入れてそれまでの理論限界を突破したように、革新的な特性改善を目指して今後も新技術の開発を継続していく。

## 文献

- (1) Nakagawa, A. "Non-Latch-Up 1200V 75A Bipolar-Mode MOSFET with Large ASO". IEDM technical digest. San Francisco, CA, USA, 1984-12, IEEE, p.860-861.
- (2) Kitagawa, M. "A 4500V Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar Transistor (IEGT) Operating in a Mode Similar to a Thyristor". IEDM technical digest. Washington, D.C., USA, 1993-12, IEEE, p.679-682.
- (3) 家坂 進, ほか. パワーエレクトロニクス用大容量IEGT. 東芝レビュー. 55, 7, 2000, p.7-10.



二宮 英彰 NINOMIYA Hideaki

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 先端ディスクリート素子開発部参事。パワーデバイスの開発に従事。電気学会会員。  
Discrete Semiconductor Div.



梅川 真一 UMEKAWA Shinichi

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 開発技術部参事。パワーデバイスの開発に従事。  
Discrete Semiconductor Div.



脇山 成一郎 WAKIYAMA Seiichiro

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 パワー半導体応用技術部参事。パワーデバイスの開発に従事。  
Discrete Semiconductor Div.



西谷 和展 NISHITANI Kazunobu

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 ハイパワーデバイス技術部参事。パワーデバイスの開発に従事。  
Discrete Semiconductor Div.